

ドッキングフード方式によるシールドマシンの地中接合 DIRECT UNDERGROUND DOCKING BY THE SHIELD MACHINE WITH DOCKING HOODS

浦沢義彦*・矢吹忠平*・桑原弘昌*・山下智之*

Yoshihiko URASAWA, Chuhei YABUKI, Hiromasa KUWABARA and Tomoyuki YAMASHITA

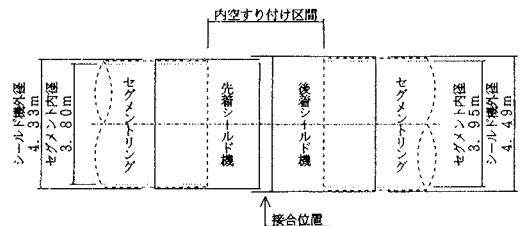
Direct underground docking of two shield machines was performed in the Narita sand layer. Since these two shield machines have different required diameters as electric power transmission tunnels, six independent docking hoods, which protrude to overlap to the smaller shield machine, were equipped on the periphery of the larger one. These hoods were also used as retaining walls so as to minimize the chemical grouting area. Stringent control, as well as precise position of the relative location between these two machines, was most critical. However, there were also several other important technical considerations in order to complete the full length slid of the docking hoods as mentioned in this paper.

Keyword: direct underground docking, six independent docking hoods, excavation error, docking accuracy, draw of over cutter

1. はじめに

東京電力㈱では、船橋市内に総延長15kmの 500kV地中送電線ルートを建設中である。この内、本報告における件は、県道下約11mに、セグメント内径3,950mm, 総延長1,698mの洞道を泥水加圧シールドマシンにより構築し、隣工区の内径3,800mm, 総延長867mの洞道と連携するものである。連携は、住宅密集地で立坑用地の確保が困難であることから地中接合で行うこととし、さらに、図-1に示すように両工区洞道の必要内径の違いから、シールド機間にも約 150mmの外径差が生じることに着目し、外径の大きい後着シールド機にドッキングフードを装備¹⁾することにした。

本稿では、フード摺動という比較的簡易な機構により、シールドマシン同志を直接地中接合させる方法を計画し、実施した結果と得られた知見について報告するものである。



2. 地盤特性およびシールドマシン地中接合方式の選定

図-1 地中接合部分での必要内空変位

今回、地中接合工事を行うのは、地下11m (シールド機天端深度) の成田砂層中で、N値40, 均等係数4の比較的均一な粒径で、細粒分は12%以下である。また、シールド機天端深度付近に地下水が存在し、地中

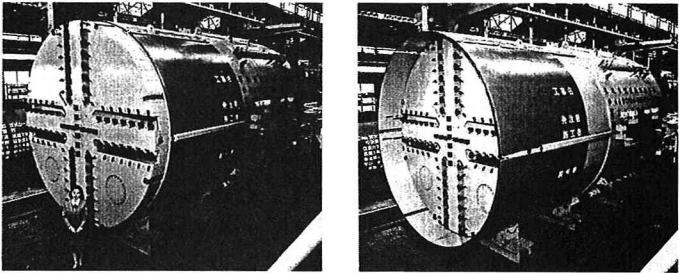
* 正会員 東京電力株式会社 地中線建設所 船橋工事事務所

接合部での透水係数は $8.9 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ である。そこで、本施工地点で適用可能な①凍結工法、②カッターディスク摺動工法、③ドッキングフード方式を比較した結果、間隙水圧が最も高くなるシールド機下部でも 0.4 kgf/cm^2 程度で、湧水対策等の補助工法を併用すれば接合部での砂の流動化を防げ、切羽の安定性も確保できることから、簡易な機構で安価なドッキングフード方式を採用することにした。

3. ドッキングフード方式による地中接合の概要

3・1 ドッキングフード

今回の地中接合工事においては、接合させる2台のシールド機に外径差があることから、後着するシールド機にドッキングフードを装備させ、先着シールド機のスキンプレートまでラップするよう貫入させることにした。通常掘進時のシールド機の状態を写真-1(a)に、ドッキングフードをスライドさせた状態を写真-1(b)に示す。



(a) 通常掘進時 (b) ドッキングフードスライド時

写真-1 ドッキングフード装着シールド機

シールド機の下部ほど深度に伴う土圧が大きくなることから、ドッキングフードの貫入抵抗も大きくなることが予想される。またドッキングフードは、後着シールド機到達後の面盤解体時、一時的に地山を保持する役割を担っていることより、最悪でも先着シールド機の上半部を覆いたいという施工の確実性を考慮し、一体型フードではなく、分割型フードを採用した。一方、施工の安全性から、ドッキングフード貫入時のねじれを防止するため、摺動ジャッキはフード一枚につき2本設置することにしたが、スペースの関係で設置可能本数は12本であり、最大可能フード分割数は6枚となる。そこで、3・2で述べる総計4本のオーバー/コピー・カッターのうち何本かが引込み不可能となっても、貫入できるフードの枚数を最多にできる6分割が最適であると判断した。ただし、先着シールド機外径と後着シールド機のドッキングフード内径との間に生じる隙間だけでなく、分割したドッキングフード間にもスリットが存在することから、これらの部分での止水性確保および砂の流入防止のため、補助工法としての地盤改良は必要となる。

装備すべきフード摺動ジャッキ推力は、ドッキングフードのスライドを杭の貫入にモデル化し、建築学会「基礎構造設計基準」の打込み杭の許容支持力の算定式から推定した。地盤改良によるN値、粘着力の増加を考慮した結果、ドッキングフード1枚当たりの貫入抵抗力は136tとなり、これに安全率1.2を見込んだ160tをドッキングフード1枚当たりの摺動ジャッキ装備推力とした（摺動ジャッキ1本当たりの最大推力は80t）。

3・2 オーバーカッター

ドッキングフードは従来、通常のシールド機の外側に装備するため、フードの厚さ分だけマシン外径を大きくせざるを得ない。今回採用した後着シールド機は、マシン全長のうちドッキングフード長分のスキンプレート径のみを、摺動時の強度計算上必要なフード厚(25mm×2)だけ小さくする二重構造とし、マシン外径を通常型と同じにしている。しかしながら、フード摺動を考慮し、面盤はシールド外径よりフード厚分だけ小さくしているため、図-2(a)に示す

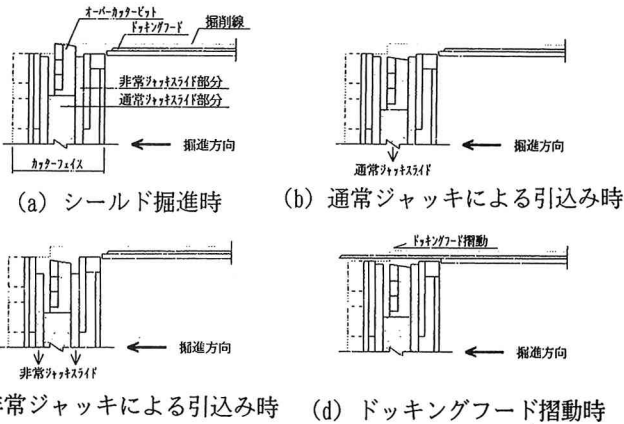


図-2 オーバーカッター概念図

ように、外周部に設けたオーバーカッターによりシールド掘進を行う。よって、掘進完了後にはオーバーカッターのマシン内への引込みの必要がある。

オーバーカッターの通常ジャッキは、機械的な摺動抵抗および長距離掘進に伴うオーバーカッターの曲がり変形によるガイドとの干渉摩擦抵抗に、十分耐え得るよう設計しており、図-2 (b)に示すようにカッター部分のみをスライドさせて引込むことにしている(引込み能力12t)。ところが、オーバーカッターの過剰変形、通常ジャッキの故障等により、オーバーカッターの引込み作動が不可能となった場合、ドッキングフードのスライドが出来なくなる事態が発生する。このような事態を回避するため、図-2 (c)に示すような、オーバーカッター自身が伸びたままでもカッター装置全体をスポーク内に収納できる非常ジャッキ(引込み能力30t)を装備し、引込みの信頼性の向上を計った。オーバーカッター引込み後のドッキングフード摺動状況を、図-2 (d)に示す。

なお、この後着シールド機には、オーバーカッターが3本、同仕様の曲線施工用コピーカッターが1本、総計4本の引込みを必要とするカッターが装備されている。

3・3 地中接合の施工手順

本工事における地中接合の施工フローを図-3に示す。また、ドッキングフード方式による地中接合に伴う施工の概要と重点管理項目の一覧を、表-1に示す。

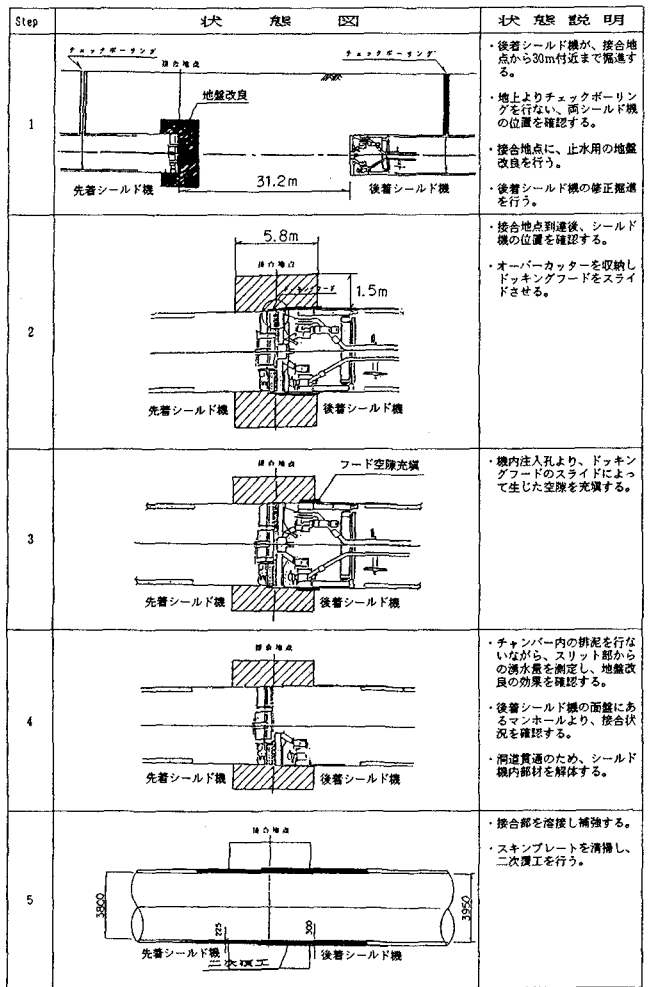


図-3 地中接合の施工フロー

表-1 地中接合施工および管理表

作業のフロー		施工概要		管理項目		品質水準を確保 出来ない場合の 影響	管理結果
単位工程	作業単位			管理項目	品質水準		
地中接合	シールド機相対 位置確認	後着シールド機のドッキングフードを、先着シールド機のドッキングフード部分に所定の長さラップさせられるよう、正確な修正掘進が必要であるため、接合地点まで31.2mの掘進でチェックボリングを行ない、その後到達まで掘進(リング毎にシールド機の目標基準から鉛直・水平方向のずれ(掘進誤差))および軸角を測定。	・後着シールド機の先着シールド機に対する相対誤差	・先/後シールド機面距離が30m地点でのみずれが45mm以内	・修正掘進におけるセグメント組立て精度が低下する	・先/後シールド機面距離が30m地点でのみずれが鉛直 7mm 水平 16mm	・先/後シールド機面距離が30m地点でのみずれが鉛直 7mm 水平 16mm
	修正掘進		・後着シールド機の最終到達精度	・80mm以内	・ドッキングフードの先着シールド機スキンプレートへの目標ラップ長が確保できない	・距離 47mm 鉛直 4mm 水平 2mm 軸角 0° 5' 46" 0° 6' 29"	・距離 47mm 鉛直 4mm 水平 2mm 軸角 0° 5' 46" 0° 6' 29"
	オーバーカッター 引込み	ドッキングフード厚さ分だけの余剰掘進を目途に通常掘進にてオーバーカッターを使用しているため、フード摺動時にはカッターを機内へ収納する必要がある。カッターの収納は通常引込みジャッキにて行ない、トラバースを固定し、カッター装置全体を引込むための非常ジャッキも装備している。	・ドッキングフード摺動クリアの確保	・30mm(フード厚25mm+余剰量5mm)以下のカッター引込み	・一部のドッキングフードのスライドが不可能となる	・通常ジャッキにより、問題なく想定最大収縮率である85mmの引込み完了。非常ジャッキを使用する必要はなかったものの、制動確認では問題なく作動。	・通常ジャッキにより、問題なく想定最大収縮率である85mmの引込み完了。非常ジャッキを使用する必要はなかったものの、制動確認では問題なく作動。
	フード摺動	面盤の解体時に一時的に地山を保持させるため、先着シールド機外周に100mm以上のラップさせられるようドッキングフードを摺動する。摺動長はフードジャッキ内油流管から換算し、デジタルパネルに表示される数値をもって管理。	・スライド量	・1017mm以上(フードが100mm以上、先着シールド機スキンプレートにラップ)	・ドッキングフードの先着シールド機スキンプレートへの目標ラップ長が確保できない	・ドッキングフード全8枚を1017mm以上スライドさせることに成功。	・ドッキングフード全8枚を1017mm以上スライドさせることに成功。
	スライドフード ボイド充填	後着シールド機は、フード長分のスキンプレートを分割して小さくしたまま掘進しているため、フード摺動時にはシールド機外周に摺動長分のボイドが発生する。このボイドを充填するため、裏込め材を機内から注入する。	・ゲルタイム ・注入圧 ・強度 ・地盤沈下	・30~40秒 ・注入圧が上昇した時点で中止 ・ $G_{100} = 15 \text{ kgf/cm}^2$ ・事前検針値(掘進機上部で11mm)以下	・ボイドに裏込め材が十分充填されず地盤沈下が生じる恐れがある。	・全ての管理点に関して品質水準をクリア。掘進機上部での地盤沈下量は1mm。	・全ての管理点に関して品質水準をクリア。掘進機上部での地盤沈下量は1mm。
	湧水量確認 マシン解体	チャンバー内の泥水の排出時に、面盤とフードおよび分割フード間のスリットから流入する湧水量を測定することにより、地盤改良による止水効果の確認を行う。湧水量が認められず、湧水量も湧水解析より算出した許容量(6ℓ/min)以下であることが確認された後、シールド機内部材の解体を開始する。	・スリットからの 湧水および湧水量	・湧水なし ・湧水量 5 ℓ/min以下	・地盤沈下が生じる恐れがある。	・湧水は見られず、湧水量も0 ℓ/min。スライドフードボイド充填後の沈下量(1mm)からの増分なし。問題ない。シールド機内部材の解体を開始。	・湧水は見られず、湧水量も0 ℓ/min。スライドフードボイド充填後の沈下量(1mm)からの増分なし。問題ない。シールド機内部材の解体を開始。

4. 施工実績

4・1 シールド機到達精度

ドッキングフードを先着シールド機円周に完全にラップさせるにあたって、図-4 (a)に示すように先・後着シールドの掘進基線が平行の状態では、軸角 $\theta = 0^\circ$ には、鉛直・水平方向ともに最大芯ずれ $\delta = 50\text{mm}$ の到達誤差が許される。ところが、図-4 (b)に示すように先・後着シールド機の掘進基線にある一定以上の角度（軸角 θ ）の付いた状態で接合すると、ドッキングフードがスライド途中で先着シールド機外周に接触する可能性がある。到達精度については、軸角、芯ずれの両方で制約されるが、今回は先着シールド機のスキンプレートにフードをラップさせられる範囲内で、表-2に示す実績等^{2), 3)}も踏まえ、軸角 θ を 1° 以下とし、この時の芯ずれ $\delta = 38\text{mm}$ 以内を目標到達精度とした。

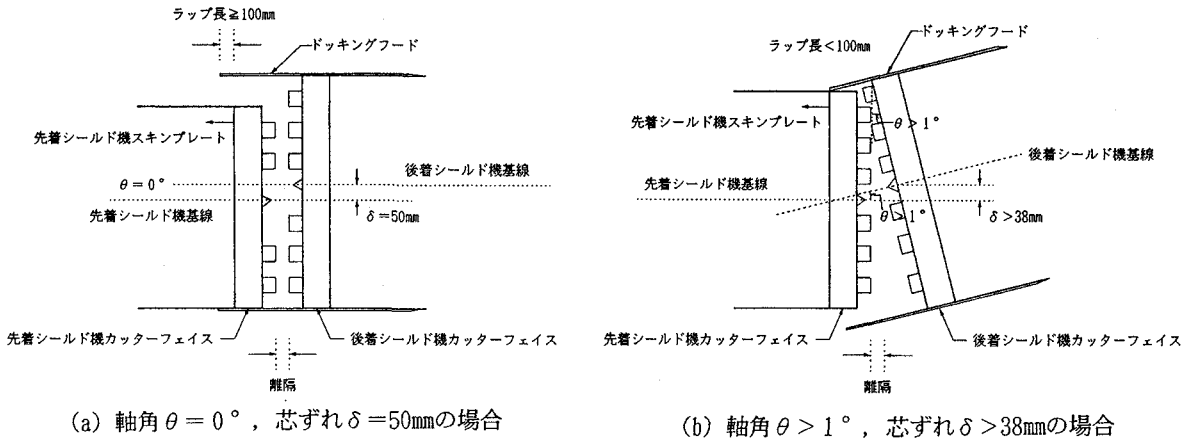


図-4 接合時の軸角（ θ ），芯ずれ（ δ ）とフードラップ長の関係

一方、地上からのチェックボーリングが可能であれば、測量による相対誤差は17mm（チェックボーリング間距離100mで算出）と推定され、過去の実績から、掘進制御において目標基線とシールド機センター位置のずれで表される掘進誤差が、鉛直・水平方向ともに10mm程度と見込んで、現状の技術レベルでのドッキングフード方式による地中接合は、精度上十分可能であると判断した。公道上でのチェックボーリングは、種々の制約を受けるため、任意の位置に設置することはできないが、今回は先着シールド機と後着シールド機の面盤間距離が31.2m（残りセグメント数23リング）まで接近した地点に設けることが可能となった。そこで、スタンダードセグメントとテーパーセグメントの使用組み合わせ、および修正掘進計画からみて、セグメント組立線形精度を低下させることなく修正可能な、この地点での先着シールド機と後着シールド機の相対誤差を45mm以内と算出し、これを線形管理基準値とした。実施工における、先着シールド機と後着シールド機の面盤間距離31.2m地点での相対誤差は、鉛直 7mm、水平16mmであった。

またそれ以降は、掘進精度を向上させるため、ジャッキスピードを通常時平均の35mm/minから25mm/minに落として掘進させるとともに、掘進誤差の測定も通常時の約10リング毎（12m毎）から、セグメント組立て

表-2 直接地中接合の到達精度実績

工 事 件 名 (工期)	シールド工法	地中接合目標値	地 中 接 合 実 績 値	補 助 工 法	測 量 方 法
城東上野線管線 新設工事 (S56.6~S60.10)	泥水式	芯ずれ 100mm	芯ずれ 鉛直 5mm 水平 8mm	CJG 薬液注入 発泡モルタル (道路下)	接合地点から94m手前に地上からのチェックボーリングを行い、坑内測量を実施。
富津〜袖ヶ浦間 ガス導管新設工事 (B1.1~B4.9)	泥水式	芯ずれ 30mm 軸角 1°	芯ずれ 鉛直 1mm 水平 1mm 軸角 鉛直 $0^\circ 5' 28''$ 水平 $0^\circ 1' 27''$	凍 結 工 法 (海底下接合)	接合地点30m手前で水平ボーリング孔を設け、磁気センサーとR1センサーを組合せた閉鎖位置検知システムによって測量。15m手前で閉鎖検知に使用した水平ボーリング孔を用いて直接測量を実施。
港北変電所付近 管線新設工事 (B1.12~B6.12)	泥水式	芯ずれ 60mm	芯ずれ 鉛直 7mm 水平 21mm 軸角 鉛直 $0^\circ 17' 00''$ 水平 $0^\circ 9' 32''$	凍 結 工 法 (道路下)	接合地点から80.5m手前に地上からのチェックボーリングを行い、坑内測量を実施。到達後には精度確認のため、水平ボーリングを行う。
三咲付近管線 新設工事 (B3.3~B6.9)	泥水式	芯ずれ 38mm 軸角 1°	芯ずれ 鉛直 4mm 水平 2mm 軸角 鉛直 $0^\circ 5' 46''$ 水平 $0^\circ 6' 29''$	ドッキング フード工法 薬液注入 (道路下)	接合地点から60m手前（相対するシールド機面盤間の距離は31.2m）に、地上からのチェックボーリングを行い、坑内測量を実施。

毎（1.2m毎）に頻度を上げて行なった。図-5に接合までの最終23リングにおける、鉛直・水平方向への掘進誤差のヒストグラムを示す。掘進誤差の最大値は、鉛直方向では上13.0mm、下5.0mm、水平方向では左11.0mm、右8.0mmであった。95%の上・下信頼区間からシールド機の掘進誤差は、鉛直方向には上9.7mmから下5.8mmまでに、水平方向には左11.7mmから右11.5mmまでにはほぼ収めることができると判断出来る。これらの値は、設計時に予想していた掘進誤差10mm程度という値に、ほぼ一致している。また、水平方向への誤差が鉛直方向に比べ若干大きい事が分かった。

後着シールド機が接合地点到達直後に行った坑内測量の結果、実際の到達精度は、鉛直方向・上4mm、水平方向・右2mm、軸角0°6′、離隔47mmである。これらは、設計時の許容到達精度を十分クリアするものである。

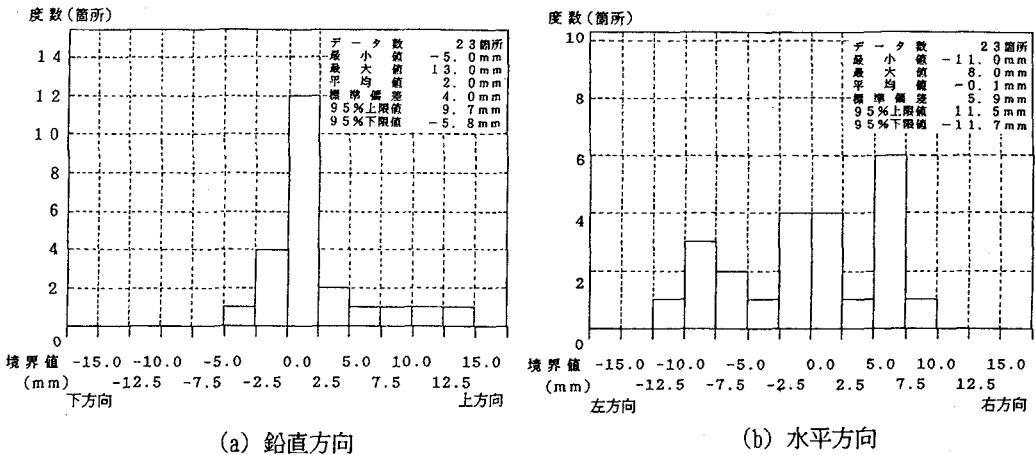


図-5 掘進誤差ヒストグラム

4・2 ドッキングフード摺動

後着シールド機の到達後、ドッキングフードのスライドを前にオーバーカッターのマシン内への収納作業を行ったところ、当初の計画通り、通常ジャッキのみで完全に引込むことができた。さらに、通常ジャッキ等のトラブル時の安全装置として装備した非常ジャッキは、使用する必要はなかったがその制動の確認のために作動させてみたところ、何の問題も無くカッター装置全体を引込むことができた。

ドッキングフードに関しては、面盤の解体時に、一時的に地山を保持しなければならないため、先着シールド機の面盤より後方のスキンプレート部に支持点を持つ必要がある。後着シールド機が先着シールド機に対して1°上方に傾き、底面で位置が揃った状態で接合するという、上部フードを最も長くスライドさせる必要のあるケースを想定し、地盤を主動崩壊させないためのフードの支点位置を検討したところ、先着シールド機のスキンプレートへ100mm入った所という結果が得られた。よって、これを目標にドッキングフードをスライドさせることにした。実際の到達精度が軸角0°6′、離隔47mmであったことより、必要フード摺動長は1017mmである。

ドッキングフードは、表-3中に示す切羽方向へのフード番号配置で、①→②→⑥→③→⑤→④の順にスライドさせていった。摺動ジャッキの推力切替えの関係から、155tまで一気に推力を上昇させてスライドさせた。摺動長はフードジャッキ内流入油量より換算し、デジタルパネルに表示される数値によって管理した。その結果、表-3のように最も貫入しづかった下部フード④でも、先着シールド機スキンプレー

表-3 ドッキングフード摺動結果

スライド長(mm)	
フード番号	推力155t
①	1054
②	1055
③	1055
④	1036
⑤	1055
⑥	1056
必要摺動長	
1017	

フード配置図

(向 後着シールド機切羽)

摺動順序
①→②→⑥→③→⑤→④

トへ 119mmのラップ長を確保でき、全6フードとも、必要フード摺動長である1017mm以上摺動させることができた。

しかしながら、摺動ジャッキ最大装備推力には安全率を見込んでいたにもかかわらず、下部フード④で見えるかぎり貫入力に余裕がなかったことは、フードのスライドを杭の貫入にモデル化して打込み杭の算定式を用いたこと、あるいは薬液注入により止水性だけでなく地盤強度まで必要以上に向上させてしまったことの、いずれかに原因があると思われる。

ドッキングフードの摺動後、チャンバー内の泥水を排出させながら、地山よりスリットを通じて流入する湧水量を測定した結果、許容量である 6ℓ/min を若干越えたため、必要量だけ補足注入を行なった。その結果、湧水は無くなり、完全な止水性が確保できた状態でシールド機内部材の解体を開始することができた。

5. まとめ

今回、ドッキングフード方式によるシールド機の地中接合を実施し、以下のような結果が得られた。

- ①接合地点約30m手前から修正掘進を行った結果、鉛直方向・上4mm、水平方向・右2mm、軸角 0° 6'、離隔47mmという非常に高い到達精度で接合させることができた。
- ②修正掘進中の掘進誤差は、鉛直方向より水平方向が大きく現れたが、設計時に想定していた10mm程度以内にはば納めることができた。
- ③ドッキングフード摺動前のオーバーカッター引込みは、トラブル時のバックアップ装置として装備していた非常ジャッキを用いる必要なく、通常ジャッキにて完全に収納することができた。
- ④ドッキングフードに関しては、貫入が最も困難であったシールド機下部においても、必要摺動フード長以上にスライドさせることができ、フード6枚全て先着シールド機のスキンプレート部にラップさせることに成功した。

今後は今回の施工より得られたデータをもとに、将来の同種施工への反映を目指し、①必要到達精度を満足させるための最少チェックボーリング数、②止水性を確保し、且つ装備されたドッキングフードジャッキ能力から得られる最大地盤強度以内に改良効果をおさえる薬液注入の可能性、③オーバーカッター収納不可能時に貫入可能なフード枚数を最多にできるフード分割数と、スリット数を少なくし、この部分からの湧水の可能性を最小限に押さえるためのフード分割数から、総合的に判断される分割最適数等、に関して探究してゆく予定である。

(参考文献)

- 1) 成広明雄 松島輝男：スライドフードによる既設トンネルへのシールド地中接合法，建設の機械化，1988. 12.
- 2) 本山智啓・千葉忠義・須貝静雄・武田邦夫・遠藤 勝：世界初のシールド同志の直接地中接合，トンネルと地下，pp. 25 ～ 32，1993. 1.
- 3) 金谷嘉久・森 勝政：海底下での地中ドッキングー中部電力LNGガス導管ー，トンネルと地下，1987. 8.
- 4) 本山智啓・山本 進・萩原英樹・西岳 茂：メカニカルシールドドッキング（MSD）工法の実施工，土木学会誌，pp. 13 ～ 15，1993. 2.